

УДК 550.8.04:551.343.72:550.837(571.56-191.2)  
DOI 10.17513/use.38358

## МОНИТОРИНГ ИЗМЕНЕНИЯ СТРОЕНИЯ БУГРОВ ПУЧЕНИЯ МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ В ЧУРАПЧИНСКОМ РАЙОНЕ ЯКУТИИ

**Саввинов И.И., Федорова Л.Л.**

*ФГБОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова»,  
Якутск, e-mail: gmpirmpi@mail.ru*

Основной целью геофизических исследований, представленных в данной статье, является оценка эффективности комплексного применения методов электроразведки для изучения состояния и строения бугров пучения аласов Центральной Якутии в режиме мониторинга. Проведены разносезонные геофизические измерения методами электросопротивлений в варианте электротомографии и бесконтактных измерений электрического поля и георадиолокации. В летний период, по данным акваторных георадиолокационных зондирований, прослежен рельеф дна озера внутри впадины. Электротомография выполнена как наземными, так и погруженными установками в водной части профиля. В зимний период применена аппаратура бесконтактного измерения кажущегося сопротивления. По результатам выполненных работ построены геоэлектрические разрезы с учетом рельефа. Комплексный анализ и интерпретация данных геофизических исследований показали хорошую корреляцию результатов выполненных геофизических измерений. При сравнении геоэлектрических разрезов, полученных в разное время года, отмечено, что за летний период произошли значительные изменения в границе ледяного ядра бугров пучения. Мониторинговые измерения показали уменьшение подозерного талика в размере за летний период и динамику увеличения ледяных ядер бугров пучения осенью. Полученные результаты геофизических наблюдений методами электроразведки показали эффективность применения этих методов для выявления и картирования подповерхностных геокриологических объектов. Для объективной оценки динамики состояния и строения бугров пучения рекомендуется проводить геофизические измерения в разные сезоны года.

**Ключевые слова:** бугор пучения, ледяное ядро, криогенные процессы, электротомография, георадиолокация, бесконтактное измерение электрического поля, донная съемка

*Исследования проведены в рамках Программы комплексных научных исследований в РС (Я), направленных на развитие производительных сил и социальной сферы на 2021–2024 гг. (проект № 4, этап 2, ЕГИСУ НИОКТР № АААА-Б-17-217060520052-0).*

## MONITORING OF CHANGES IN THE STRUCTURE OF PINGO BY ELECTRICAL EXPLORATION METHODS IN THE CHURAPCHINSKY DISTRICT YAKUTIA

**Savvinov I.I., Fedorova L.L.**

*Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, e-mail: gmpirmpi@mail.ru*

The main purpose of the geophysical research presented in this article is to evaluate the effectiveness of the integrated application of electrical exploration methods to study the condition and structure of the pingo of the Alas of Central Yakutia in the monitoring mode. Seasonal geophysical measurements using electrical resistance methods in the form of electrotomography and non-contact measurements of the electric field, and Ground Penetrating Radar method were carried out. In the summer, according to the data of the aquatic GPR soundings, the relief of the lake bottom inside the depression was traced. The electrotomography was performed by both land-based and submerged installations in the water part of the profile. In winter, non-contact apparent resistance meter was used. Based on the results of the work performed, geoelectric sections were built taking into account the relief. A comprehensive analysis and interpretation of the geophysical research data shows a good correlation of the results of the performed geophysical measurements. When comparing geoelectric sections obtained at different times of the year, it was noted that during the summer period there were significant changes in the boundary of the ice core of the heave mounds. Monitoring measurements showed a decrease in the size of the atmospheric talik over the summer period and the dynamics of an increase in the ice cores of pingo in autumn. The obtained results of geophysical observations using electrical exploration methods have shown the effectiveness of using these methods to identify and map subsurface geocryological objects. For an objective assessment of the dynamics of the condition and structure of the pingo, it is recommended to carry out geophysical measurements in different seasons of the year.

**Keywords:** pingo, ice core, cryogenic processes, electrotomography, georadiolocation, non-contact measurements of the electric field, bottom survey

*The research was conducted within the framework of the Program of comprehensive scientific research in the Republic of Sakha (Yakutia) aimed at developing productive forces and the social sphere for 2021–2024 (project No. 4, stage 2, No. АААА-Б-17-217060520052-0).*

### Введение

В настоящее время из-за потепления климата происходят изменения температурного состояния многолетнемерзлых пород. Этот процесс проявляется как уменьшение площади распространения многолетнемерзлых пород и сокращение мощности мерзлой толщи. В результате изменения мерзлотных условий, деградации многолетнемерзлых пород происходит активизация криогенных процессов, вытаивание подземного льда бугров пучения, увеличение площади таликов, изменение глубины сезонного протаивания [1].

Например, летом 2023 г. в Чакурском наслеге Чурапчинского улуса, вблизи с. Толон, из-за таяния ледяного ядра бугра пучения образовалась огромная впадина, вследствие чего произошло обнажение мощного слоя вечной мерзлоты. На территории Чакурского наслега существует несколько бугров пучения, объектом нашего исследования является самый крупный из них. В настоящее время для исследования состояния и строения геокриологических объектов активно используются геофизические методы, по данным которых доказано наличие сформировавшихся ледяных ядер внутри бугров пучения [2].

Проведение геофизических работ в Центральной Якутии с резко континентальным климатом имеет свои особенности. Продолжительная морозная зима (абсолютный минимум  $-66\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), с коротким жарким летом (абсолютный максимум  $+37\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и малым количеством атмосферных осадков влияют на динамику развития и состояния геокриологических объектов. Для получения достоверной информации об изменении состояния и строения бугра пучения в этом регионе необходимо проводить мониторинговые наблюдения в разные времена года, с использованием наиболее подходящих инструментов для проведения полевых геофизических работ.

Основной целью геофизических исследований, представленных в данной статье, является оценка эффективности комплексного применения методов электроразведки для изучения состояния и строения бугров пучения аласов Центральной Якутии в режиме мониторинга.

#### *Характеристика объекта исследования*

Бугры пучения (булгунняхы, пинго) – выпуклые формы мерзлотного релье-

фа, обычно конической формы, которые формируются в районах прерывистого и сплошного распространения многолетнемерзлых пород [3, с. 350]. Все они в основании имеют более или менее крупное ледяное ядро. Изучаемый авторами объект состоит из комплекса двух бугров пучения (большого и малого) и имеет инъекционный тип образования, который сформировался в процессе промерзания влаги под действием гидростатического давления из замкнутых объемов межмерзлотных таликов при расширении мерзлых грунтов [4]. Максимальная высота бугра пучения, по данным исследований морфометрических характеристик, достигает 13 м. Верхняя часть бугра пучения сложена серовато-бурыми супесями.

До формирования впадины на поверхности большого бугра было мелкое озеро, образовавшееся в результате скопления атмосферных осадков и грунтовых вод. Это озеро ускорило процессы разрушения бугра и обнажения многометрового слоя мерзлоты, которые привели к образованию впадины с более крупным озером, над ледяным ядром. При визуальной оценке малого бугра пучения можно отметить образование оврага на его поверхности, что с течением времени может привести к разрушению и обнажению его ледяного ядра.

### Материалы и методы исследования

Методы сопротивлений являются ведущими методами электроразведки при проведении инженерно-геологических изысканий в криолитозоне. Это объясняется существенным различием электрических свойств мерзлых и талых горных пород [5]. Основным фактором при обосновании выбора рационального комплекса применяемых электроразведочных методов являлась возможность проведения измерений в разные времена года. Исходя из этого фактора авторами было предложено проводить измерения в летнее время методами сопротивлений в варианте электротомографии, а в зимнее время – бесконтактным измерением электрического поля. Полевые работы проведены в четыре этапа, каждый из которых имеет свою специфику проведения отдельных методов и методик (таблица).

Схема профилей отдельных методов представлена на рис. 1. Профили проходят по центру впадины внутри бугра пучения с юго-запада на северо-восток.

Этапы проведения мониторинговых геофизических измерений

№ этапа	Наименования методов работы	Аппаратура	Период работ
1	Бесконтактное измерение электрического поля (БИЭП)	БИКС	Март 2024
2	Электротомография (ЭТ)	Омега-48	Май 2024
3	Акваторная георадиолокация (ГРЛ)	Георадар ОКО-2 АБ-150МГц	Июнь 2024
4	Электротомография (ЭТ)	Омега-48	Сентябрь 2024

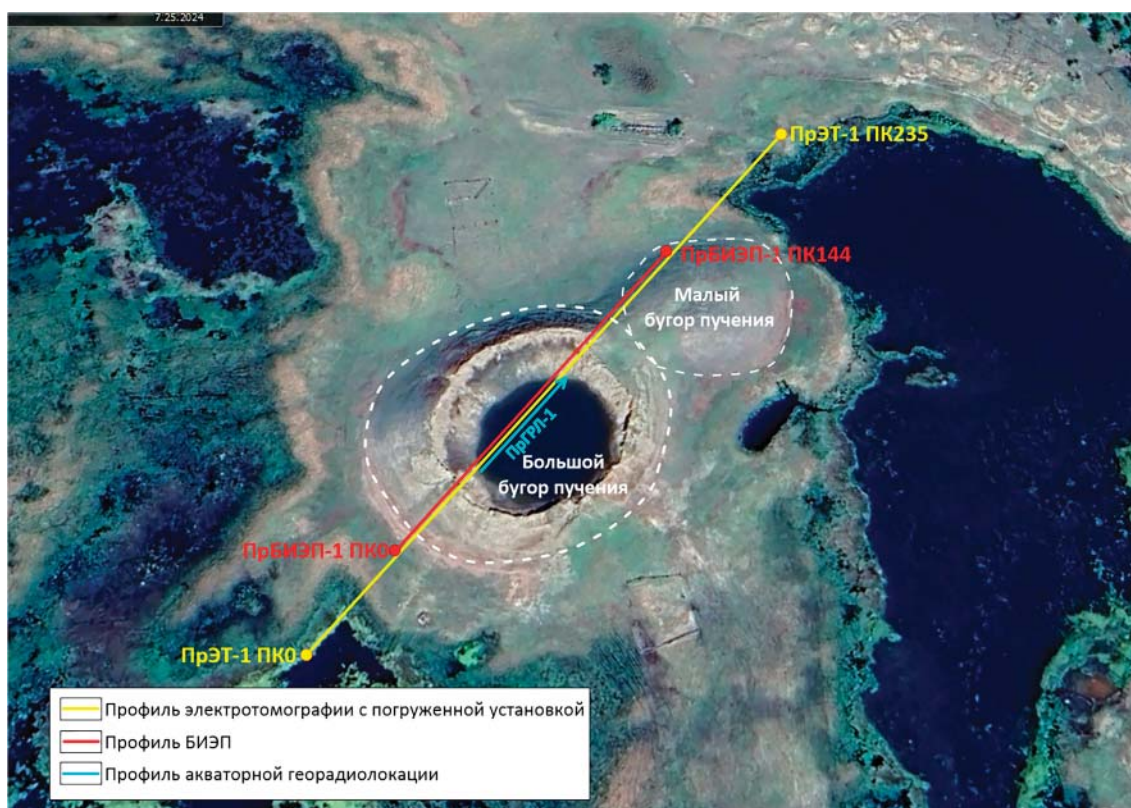


Рис. 1. Схема расположения профилей на объекте  
 Длина профилей для отдельных методов составила:  
 ГРЛ – 35 м, БИЭП – 144 м, ЭТ – 235 м

**Электротомографические исследования** выполнены с помощью многоэлектродных станций для получения двумерных или трехмерных геоэлектрических моделей. Использовалась 10-канальная 48-электродная станция Омега-48 (ООО «ЛОГИС»), с электроразведочными косами длиной 120 м и с шагом между электродами 5 м. Профиль съемки проходил через центр впадины с озером и охватывал северо-западную часть малого бугра пучения. Длина донной части профиля 35 м, а средняя глубина озера по профилю составила 2,8 м.

Для проведения измерений в летний период, когда озеро внутри впадины не имеет ледяного покрова, применялась методика

донной электротомографии [6] с герметичными электроразведочными косами, которые погружались на дно водоема с помощью якоря из стекла. Такие косы имеют способность работать в водной среде. Электроразведочная коса разматывалась к прибору, стоящему на прибрежной части озера внутри впадины (рис. 2).

Для определения электродов в качестве приемных и питающих применяются протоколы съемок. Электротомография с погруженной установкой выполнялась с установками Шлюмберже и дипольной осевой. Данное комбинирование установок считается оптимальным при исследованиях на акваториях [7].



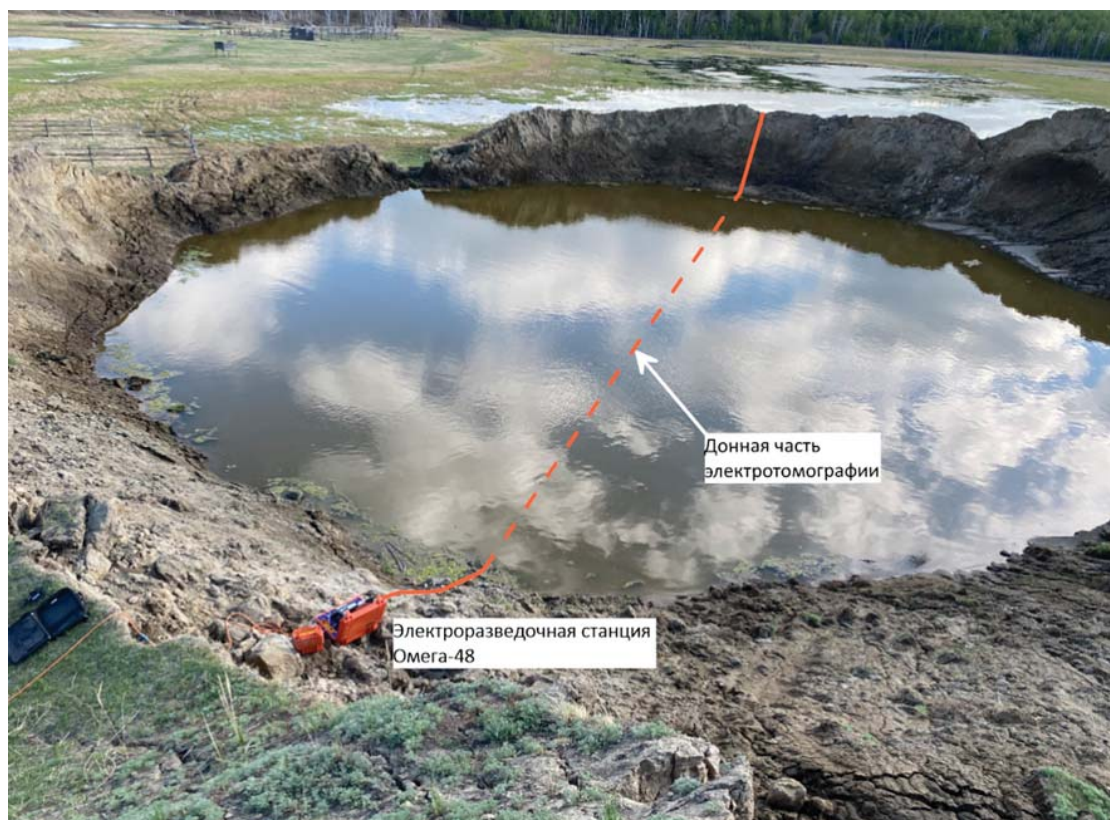


Рис. 2. Процесс измерений методом электротомографии

**Метод бесконтактного измерения электрического поля (БИЭП)**, в отличие от метода электротомографии, возможно применять в зимний период, когда заземление электродов является невозможным [8]. Для проведения бесконтактных измерений применялась аппаратура БИКС с рабочей частотой 16,6 кГц (АО «Специальное конструкторское бюро сейсмического приборостроения»). Методика измерений представляет собой электропрофилирование восьми разными разносами. Работы методом бесконтактного измерения проводились в марте 2024 г. по одному профилю с шагом 3 м. Температура наружного воздуха составила днем  $-7^{\circ}\text{C}$ , ночью  $-30^{\circ}\text{C}$ .

Для проведения измерений методом БИЭП применялись емкостные электроды в виде антенн длиной 2,5; 5 и 10 м. Установка БИКС представляет собой дипольную осевую установку с питающим и измерительным диполями одинаковой длины.

**Георадиолокационные исследования** [9] проводились на водной части профилей для определения глубины озера, где георадар использовали в качестве эхолота, с целью построения геоэлектрических разрезов с учетом рельефа местности [10]. Для ре-

шения этой задачи использовался георадар ОКО-2 (Группа компаний «ЛОГИС-ГЕО-ТЕХ») с АБ-150МГц, установленный на надувной резиновой лодке.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Полевые работы методом акваторной георадиолокации проведены в июне 2024 г. для изучения рельефа дна озера. Длина профиля составила 35 м, а максимальная глубина озера составила 3 м (рис. 3).

По результатам электроразведочных исследований были составлены геоэлектротомографические разрезы (ГЭТР) с учетом изменения рельефа местности (рис. 4). Максимальная глубина разреза достигнута в пределах 30–35 м. Известно, что области с относительно низкими значениями удельного электрического сопротивления в 10–300 соответствуют талым, а с высокими значениями, превышающими 1000 Ом·м, относятся к мерзлым породам, различной степени мерзлости и льдосодержания [4].

Геоэлектрический разрез, полученный в результате бесконтактных измерений электрического поля (рис. 4, а), имеет глубину 15 м.

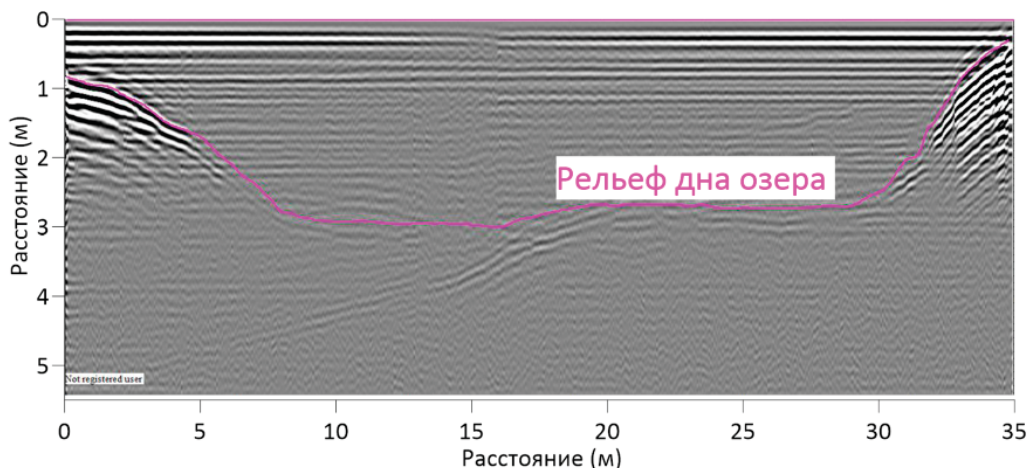


Рис. 3. Результаты акваторной георадиолокации

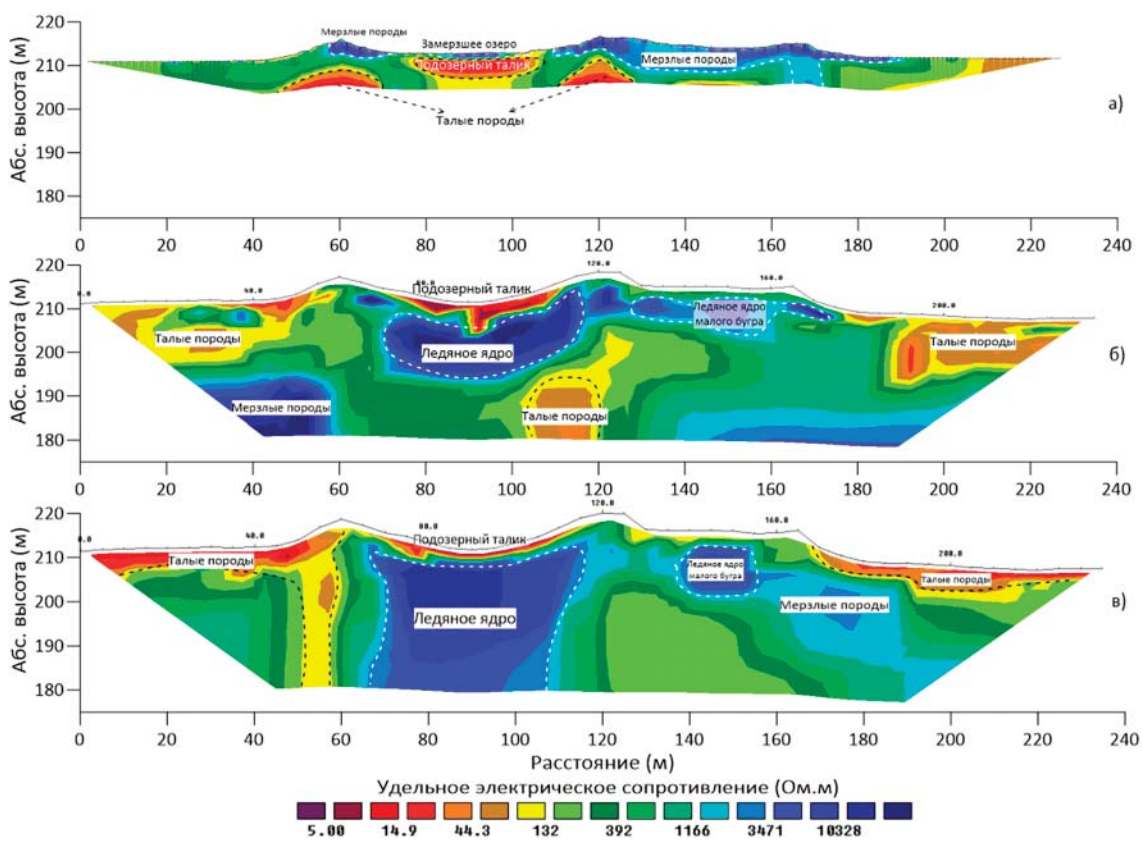


Рис. 4. Геоэлектрические разрезы по результатам электроразведочных работ:  
 а) результаты БИЭП (март 2024 г.); б) результаты ЭТ (май 2024 г.);  
 в) результаты ЭТ (сентябрь 2024 г.)

Верхняя часть разреза с высокими значениями УЭС представляет мерзлые, льдистые породы мощностью до 5 м. В районе ПК80-100 верхняя часть представлена замерзшим озером мощностью 3 м, ниже которого прослеживается подозерный талик мощностью 5–7 м. Слева и справа подо-

зерного талика в районе пикетов ПК60 и ПК120 на глубине 5–7 м наблюдаются низкие значения УЭС (20–50 Ом·м), что связано с наличием талых пород.

Результаты работ методом электротомографии в виде геоэлектрических разрезов представлены совместной инверсией



данных установок Шлюмберже и дипольная осевая. Первый этап работ методом электротомографии проведен в мае 2024 г. (рис. 4, б). Температура наружного воздуха составила днем +22 °С, ночью +9 °С. В центральной части разреза в районе пикетов 75–105 выделяются крайне низкие значения УЭС (10–40 Ом·м) от талых донных отложений, представляющих подоцерный талик мощностью до 7 м. Ниже подоцерного талика наблюдается мощная высокоомная зона (до 10000 Ом·м), что предположительно вызвано влиянием ледяного ядра бугра пучения мощностью до 12 м. Ниже по разрезу на глубине 20 м удельное электрическое сопротивление пород уменьшается до 50 Ом·м, что связано с наличием талых пород. На правой стороне профиля (ПК145-160) наблюдается зона высоких сопротивлений. Эта зона подтверждает наличие ледяного ядра малого бугра пучения, которое достигает глубины 10 м от поверхности.

Второй этап работ методом электротомографии проведен в сентябре 2024 г.

(рис. 4, в). Температура наружного воздуха составила днем +7 °С, ночью +6 °С. Верхняя часть на правой и левой сторонах разреза представлена низкими значениями УЭС (20–50 Ом·м) от талого состояния пород до глубины 5 м (ПК0-56 и ПК171-235). В центральной части разреза в районе пикетов ПК75-105 выделяются крайне низкие значения УЭС (10–40 Ом·м) от талых донных отложений, представляющих подоцерный талик мощностью до 2,5 м. Ниже подоцерного талика наблюдается мощная высокоомная зона (до 10000 Ом·м), что предположительно вызвано влиянием ледяного ядра бугра пучения мощностью более 25 метров. На правой стороне профиля (ПК137-155) наблюдается зона высоких сопротивлений. Эта зона подтверждает наличие и расширение ледяного ядра малого бугра пучения, которое достигает глубины 12,5 м от поверхности малого бугра. На правой стороне от границы ледяного ядра малого бугра пучения сопровождается менее высокими удельными электрическими сопротивлениями до 2000 Ом·м.

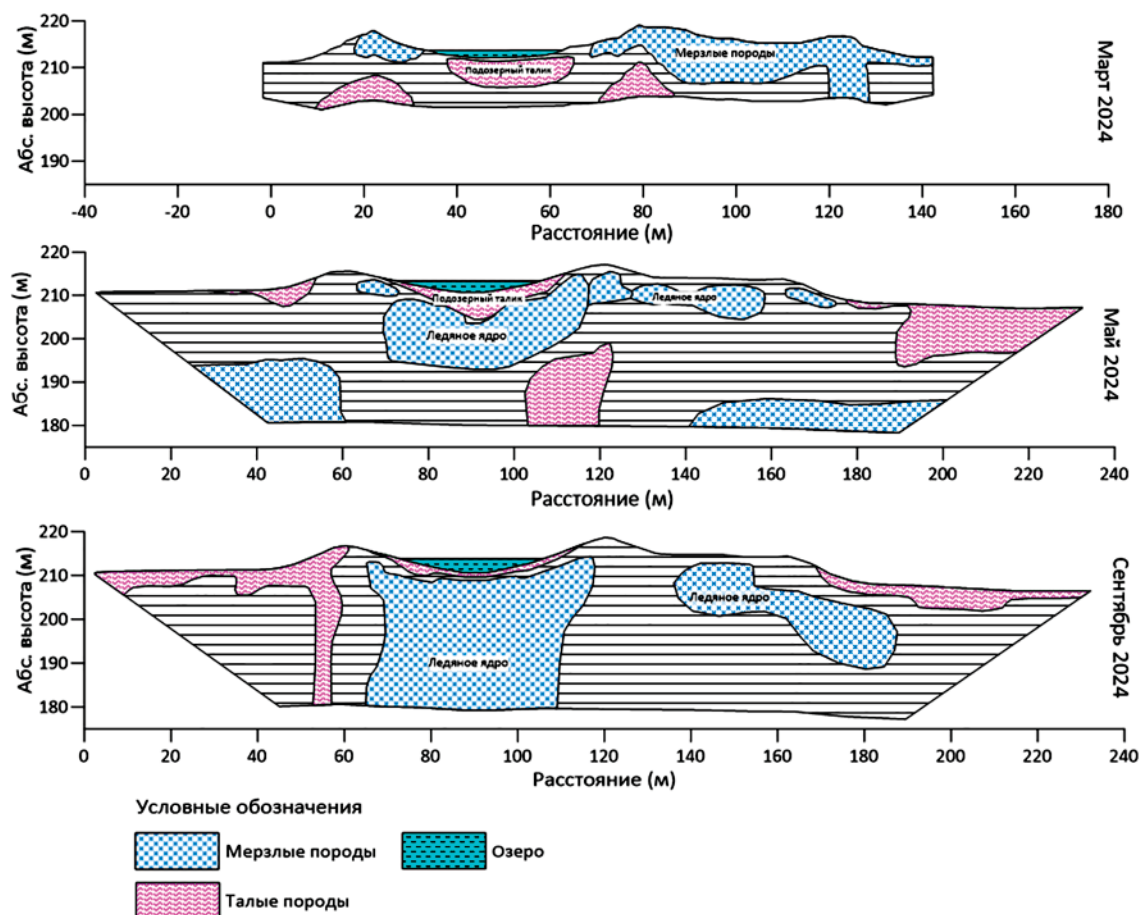


Рис. 5. Результаты интерпретации геофизического мониторинга состояния строения бугра пучения

При сравнении геоэлектрических разрезов, полученных в период мониторинга, можно отметить, что за летний период произошли значительные изменения строения большого бугра пучения (рис. 5).

Подозерный талик на ПК 75–105 по мощности уменьшился до 2,5 м. Граница ледяного ядра увеличилась в ширину до 54 м и в глубину до 30 м. Наблюдается незначительное увеличение в размере ледяного ядра малого бугра пучения, а также с проявлением справа от нее (ПК145–160) менее высоких значений УЭС. Эти изменения объясняются тем, что в период весеннего таяния снежного покрова в подземные грунты поступает большее количество грунтовых вод, образуя межмерзлотные талики. А осенью эти межмерзлотные талики, окруженные многолетнемерзлыми породами, начинают промерзать и расширяться, увеличивая размер ледяного ядра. Такой процесс, при котором промерзание происходит с расширением грунта в ширину и в глубину, называют «морозное расширение» грунта, характеризующее движение промерзающего грунта в нескольких направлениях [11]. Льды в правой и в левой стенках впадины, обнажившиеся в результате разрушения бугра пучения, из-за попадания прямых солнечных лучей за летний период полностью растаяли.

### Заключение

Полученные результаты геофизических наблюдений показали эффективность комплексирования методов сопротивлений для выявления и картирования подповерхностных геокриологических объектов: ледяных ядер бугров пучения, удельное электрическое сопротивление которых находится в пределах от 3000 до 10000 Ом·м и более, а также подозерных таликов с УЭС 10–40 Ом·м.

Проведенные исследования показали, что для мониторинга криогенного состояния и строения бугра пучения оптимально проводить измерения в разные сезоны года: бесконтактные измерения – зимой; электротомографию – летом.

Комплексный анализ и интерпретация данных геофизических исследований показали хорошую корреляцию результатов бесконтактного измерения электрического поля и электротомографии. Мониторинговые измерения показали уменьшение подозерного талика в размере за летний период и динамику увеличения ледяных ядер бугров пучения осенью.

Увеличение размера ледяного ядра может способствовать морозному расширению

грунтов, изменяя строение бугра пучения. Для анализа происходящих в дальнейшем криогенных процессов в исследованных буграх пучения рекомендуется продолжить мониторинговые измерения с использованием методов электроразведки. С целью изучения изменения рельефа дна озера необходимо проведение повторных акваторных георадиолокационных измерений.

*За поддержку и помощь в организации полевых работ авторы благодарны главе администрации МО «Чакурский наслег» Чурапчинского района РС (Я) Лебедеву К.И., жителям с. Толон Саввинову И.С., Еремееву С.Е., Сохсойоону Х.Ч., Кузьмину С.Р.*

### Список литературы

1. Ефремова Д.Н., Оленченко В.В., Горяевцева А.А. Двумерная геоэлектрическая модель широтной зональности многолетнемерзлых толщ // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2018. Т. 3. С. 102–107. DOI: 10.18303/2618-981X-2018-3-102-107.
2. Котелевец Д.В., Васильчук Д.Ю. Комплексное изучение ледоминаральных бугров пучения геофизическими методами в долине реки Сенца, республика Бурятия // Арктика и Антарктика. 2018. № 1. С. 122–132.
3. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Чижова Ю.Н. Выпуклые бугры пучения многолетнемерзлых торфяных массивов: монография. М.: МГУ, 2008. 571 с.
4. Васильчук Ю.К., Гинзбург А.П., Токарев И.В., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Паламарчук В.А., Васильчук Д.Ю., Блудушкина Л.Б., Слышкина Е.С. Стабильные изотопы кислорода и водорода в сезонных буграх пучения в долине р. Чара, Забайкалье // Арктика и Антарктика. 2024. № 2. С. 90–129. DOI: 10.7256/2453-8922.2024.2.70706.
5. Судакова М.С., Брушков А.В., Великин С.А., Владов М.Л., Зыков Ю.Д., Неклюдов В.В., Оленченко В.В., Пушкарев П.Ю., Садуртдинов М.Р., Скворцов А.Г., Царев А.М. Геофизические методы в геокриологическом мониторинге // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2022. № 6. С. 141–151.
6. Бобачев А.А. Электротомография с погруженными установками // VIII Всероссийская школа-семинар по электромагнитным зондированиям Земли имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна (ЭМЗ-2021): сборник трудов конференции (Москва, 04–07 октября 2021 г.). М: Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 2023. С. 284–289.
7. Бобачев А.А., Сергеев К.С., Горин А.Д. Акваторные электроразведочные исследования с донными установками // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации: материалы докладов Четырнадцатой Общероссийской научно-практической конференции и выставки изыскательских организаций (11–14 декабря 2018 г.). М: ООО «Геомаркетинг». 2018. С. 609–613.
8. Модин И.Н., Груздев А.И., Скобелев А.Д. Сравнение бесконтактных электроразведочных комплексов // Инженерные изыскания. 2016. № 2. С. 46–53.
9. Федорова Л.Л., Куляндин Г.А., Прудецкий Н.Д. Определение участков талых пород в многолетнемерзлом массиве по данным георадиолокации // Успехи современного естествознания. 2023. № 11. С. 192–198. DOI: 10.17513/use.38163.
10. Бобров Н.Ю., Крылов С.С., Киселев Е.Ю., Прягина Г.В., Федорова И.В. Применение георадиолокации в гидрологии // Записки горного института. 2009. Т. 183. С. 219–223.
11. Урбан А.А. Криогенный напор при формировании повторно-жильного льда и многолетних бугров пучения // Наука и образование. 2012. № 1. С. 45–49.